

記者発表資料

2022 年(令和 4 年)

9 月 23 日(金)

9:30 発表

プレスリリース

2022 年(令和 4 年)9 月 23 日

国立研究開発法人

宇宙航空研究開発機構

国立大学法人東北大学

大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構

J-PARC センター

公益財団法人

高輝度光科学研究センター

国立大学法人北海道大学

国立大学法人京都大学

国立大学法人九州大学

国立大学法人広島大学

国立大学法人東京大学

小惑星探査機「はやぶさ2」初期分析 石の物質分析チーム 研究成果の科学誌「Science」論文掲載について

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)では小惑星リュウグウ試料分析を、6つのサブチームからなる「はやぶさ2初期分析チーム」および、2つの「Phase-2 キュレーション機関」にて進めています。

この度「はやぶさ2初期分析チーム」のうち「石の物質分析チーム」の研究成果をまとめた論文が、アメリカの科学誌「Science」に 2022 年 9 月 23 日付(日本時間)で掲載されましたのでお知らせします。

タイトル: 炭素質小惑星リュウグウの形成と進化: リターンサンプルから得た証拠

原 題: Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples

掲 載 誌: Science

D O I: 10.1126/science.abn8671

概要につきましては、別紙をご参照ください。

小惑星リュウグウ試料の初期分析について

小惑星探査機「はやぶさ2」により 2020 年 12 月 6 日に地球へ帰還したリュウグウ試料は、JAXA 宇宙科学研究所に設置された施設において、初期記載(Phase-1 キュレーション)が行われました。試料の一部が、6つのサブチームからなる「はやぶさ2初期分析チーム」と2つの「Phase-2 キュレーション機関」へ分配されました。初期分析チームは「はやぶさ2」の科学目的達成のために専門サブチームが分担して、計画された高精度分析により、試料の多面的価値を明らかにします。Phase-2 キュレーション機関はそれぞれの特徴である“総合分析”に基づき、個々の「はやぶさ2粒子」カタログを作成すると同時に、粒子の特性に応じた測定・分析により、「はやぶさ2粒子」がもつ潜在的価値を明らかにしていきます。

なお、初期分析の6つのチーム、Phase-2 キュレーション機関からの報告は、論文としての成果が公表されるタイミングで、個別にお知らせしてまいります。また、全ての初期成果が公表されたのち、あらためて「はやぶさ2」サイエンス全体の総括をご説明する予定です。

以上

炭素質小惑星リュウグウの形成と進化:リターンサンプルから得た証拠

Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu:

Direct evidence from returned samples

【発表のポイント】

- 液体の水との反応を大規模に経験したリュウグウサンプルに高温環境(1000℃以上)でできた粒子(Ca、Alに富む包有物¹⁾など)が含まれていることを発見した。これらの高温微粒子は太陽近くで形成された後に太陽系外側まで移動し、リュウグウの材料物質と共に現在のリュウグウの元の天体(リュウグウ母天体²⁾)を形成したと考えられる。これは、誕生時の太陽系において内側と外側で大規模な物質混合が起っていたことを示す。
- サンプルに残された磁場の情報から、リュウグウ母天体は太陽から離れた太陽光が届かない星雲ガス³⁾の暗闇の中で生まれた可能性が高い。
- リュウグウ母天体が形成されたのは、水と二酸化炭素が氷で存在する-200℃以下の低温領域であった。
- サンプル中の結晶に閉じ込められた液体の水を発見した。この水はかつてリュウグウ母天体にあった水であり、塩や有機物を含む炭酸水であった。
- リュウグウの天体内部に存在した液体の水から、サンゴ礁のような形をした結晶が成長していた。
- リュウグウの母天体では、水と岩石の比率が表層と地下内部で異なり、地中深くの岩石の方が水を多く含んでいた。
- サンプルの硬さ、熱の伝わりやすさ、磁気特性などを測定した。その結果、リュウグウサンプルは包丁で切れるほど柔らかいことがわかった。また、小さな磁石が数多く含まれていたことから、過去の磁場を記録した天然のハードディスクであると言える。
- リュウグウ母天体の誕生から衝突破壊までのプロセスをコンピュータによるシミュレーションで再現した。小惑星の形成進化のシミュレーションに、実際の小惑星のサンプルの硬さや温まりやすさなどの測定結果を取り入れたのは世界初であり、より精密な小惑星進化の描像が明らかになった。
- このシミュレーションにより、リュウグウ母天体は太陽系形成から約 200 万年後に集積し、その後 300 万年をかけておよそ 50℃まで温まり、水と岩石の化学反応が進行したこと、直径 100km 程度のリュウグウ母天体を破壊した衝突天体の大きさはせいぜい直径 10 km 程度であること、現在のリュウグウは衝突点から離れた領域の物質からできていることがわかった。

【概要】

東北大学理学研究科中村智樹教授らの研究グループは、小惑星探査機「はやぶさ2」が回収した小惑星リュウグウのサンプル(探査機が回収した3番目に大きなサンプル(図1)を含む17粒子)を日米欧の放射光施設5か所、ミュオン施設などを利用し宇宙化学的・物理学的手法による解析を行った。その結果、リュウグウの形成から衝突破壊までの歴史(太陽系内での形成とその位置、天体材料物質の情報、含まれていた氷の種類、天体表層および内部での水との反応による化学進化、天体衝突の影響など)が判明した。また、リュウグウサンプルには、衝突破壊前の母天体の表層付近の物質と天体内部の物質が混在していることが判明した。さらに、リュウグウサンプルの硬さ、熱の伝わり方、比熱、密度などを実測し、この実測値を使って、リュウグウ母天体形成後の天体内部の加熱による温度変化、および衝突破壊プロセスの数値シミュレーションを行い、リュウグウの形成進化をコンピュータ上で再現した。

【詳細な説明】

リュウグウサンプルの分析結果から判明したリュウグウの形成史は、以下に示す6つの段階に分けられる。分析結果を導入して行った数値シミュレーションの結果を図2に示す。

1. リュウグウ母天体の形成、2. 放射性元素の崩壊熱による氷の融解、3. さらなる天体内部温度上昇による水岩石反応の進行、4. 放射性元素の枯渇による天体の冷却、5. 大規模な衝突現象による母天体破壊、6. 衝突で生じた岩片の再集合によるリュウグウ形成。

それぞれの形成段階に関してどのような物的証拠がリュウグウサンプルに残されていたのかを説明する。

リュウグウの母天体誕生

- ・サンプルに残された磁場の情報から、リュウグウの母天体は今存在しない原始太陽系星雲³⁾の中で誕生した可能性が高い。リュウグウは太陽から遠く離れた太陽光が届かない星雲ガスの暗闇の中で生まれた。
- ・リュウグウ母天体は-200℃以下の極低温の場所で誕生した。その領域には水の氷だけではなく、ドライアイス(CO₂氷)も存在していた。リュウグウ母天体は、その領域に存在していた岩石粒子と氷を取り込んで形成された。
- ・極低温でできたリュウグウに、太陽近くの高温下でできた粒子(Ca、Alに富む包有物など)を発見した(図3)。生まれたてのリュウグウには低温物質(氷とドライアイス)と太陽の近くの高温でできた物質が少量共存していた。これらの高温微粒子は太陽近くから太陽系外側まで移動したと考えられる。これは、太陽系誕生時の内側と外側の大規模物質混合の証拠となる。
- ・リュウグウサンプル 10 粒子(総計 126 mg)を使い、ミュオン⁴⁾ビームを使った軽元素を含む化学組成分析を行った(@J-PARC)。軽元素の窒素や炭素の存在度は化学的に最も始原始的な隕石(CI 炭素質隕石)に近く、リュウグウの元素存在度は極めて始原始的であることがわかった。

リュウグウ母天体形成後に起こった岩石と液体の水による反応

- ・リュウグウの原材料は、氷を含む多様な固体微粒子の集合体であった(図2と図4)。これらの原材料が天体内部で水やCO₂と反応し(水質変成)、サンプルの大部分を占める含水鉱物や炭酸塩鉱物を形成した。水質変成時の水温は、変成時に形成された鉱物の安定関係から、およそ25℃であったと推定される。
- ・サンプル中の結晶に閉じ込められた液体の水を発見した(図5)。水はミクロンサイズの空孔に保持されていた。質量分析計で分子種を調べると、水は塩や有機物を含む炭酸水であった。
- ・リュウグウサンプルは~1 mm程度の小さな岩片が集まってできた石であった。これらの岩片を構成する鉱物が多様であることは、水との化学反応の際の条件の違いで説明できる。
- ・岩片は水の割合が少ない環境(水と岩石の質量比<0.2)でできた物質と、水の割合が高い環境(0.2<水と岩石の質量比<0.9)でできた物質の2種類に大きく分けられる。前者は天体の表層付近の天体表層で冷えやすく氷が溶けにくかった環境でできた岩片(図4)であり、後者は天体内部の水が豊富な環境でできた物質であると考えられる。したがって、現在のリュウグウには、リュウグウ母天体の表層と内部の物質が混在していることが判明した。
- ・リュウグウの母天体内部で液体の水からテーブルサンゴのような形をした結晶が成長していた(図6)。このことから、リュウグウの内部には、地球の海に似た環境が存在していたと考えられる。

水との反応を経て特徴づけられたリュウグウサンプルの物性

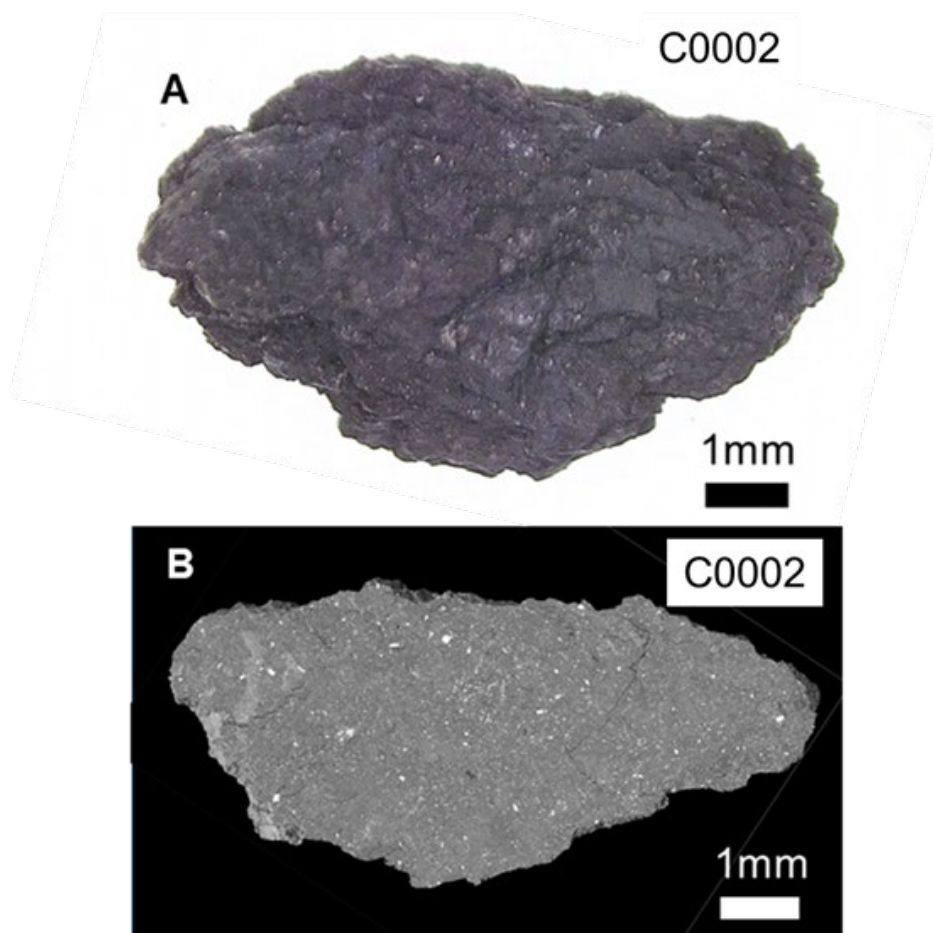
- ・リュウグウサンプルの物性(硬さ、熱の伝わり方、弾性波速度、比熱、密度など)を測定した。
- ・リュウグウサンプルの体積を空間解像度 1 ミクロン以下の放射光 CT 分析(@SPring-8)で精密に求め、質量はサンプルへの吸着水の影響を避けるため大気遮断の環境で測定した。その結果、サンプルの平均密度は $1.79 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ であり、この値は小惑星リュウグウ全体の密度(1.19 g/cm^3)より非常に大きい。このことは、小惑星内部に 30%以上の隙間があることを示唆する。
- ・リュウグウの石の硬さは地球上の火成岩の数分の 1 しかなく、柔らかかった。実際に刃物を使って切断することができた。
- ・リュウグウサンプルは磁化されていた。サンプルには磁鉄鉱が多く含まれており、この結晶の内部には特徴的な磁力線分布(渦状磁区構造:図 7)が確認された。この構造は一般のハードディスクよりも安定で、46 億年以上にわたって磁場を記録できる。磁鉄鉱の内部、および周辺の磁場はこの結晶が形成された当時の磁場を反映しており、リュウグウ母天体形成時には、太陽系は星雲ガス(磁場を持つ)に覆われていた可能性が高い。

リュウグウ母天体の熱史と衝突破壊を再現した数値シミュレーション

- ・リュウグウ母天体の誕生から大規模な衝突破壊を経て現在に至るまでを、コンピュータで再現することに成功した。実際の小惑星のサンプルの硬さや温まりやすさの測定結果を、小惑星の形成進化のシミュレーションに使ったのは世界初である。
- ・サンプルの分析結果、および物性測定結果に基づき、放射性元素の崩壊熱による天体内部の温度変化の数値シミュレーションを行った。その結果、太陽系形成後およそ 200 万年後に -200°C 以下の環境でリュウグウ母天体が形成され、およそ 300 万年後に水岩石反応が開始され、およそ 500 万年後に天体内部が最高温度($\sim 50^{\circ}\text{C}$)に達し、現在のリュウグウの構成物質が形成されるまでの過程を再現することができた。
- ・物性測定結果に基づき、リュウグウ母天体の衝突破壊の数値シミュレーションを行った。リュウグウはかつて小惑星族⁵⁾のうち、ポラーナ、またはエウラリア族に属していたと考えられており⁶⁾、これらの族に属する小惑星すべてがリュウグウの母天体が破壊されて形成されたと考えられる。この推論に基づくと、リュウグウ母天体は直径 100 km 程度の大きさであったと考えられる。この母天体に直径が母天体の 1/10 程度の大きさの他の天体が正面衝突すると、母天体は破壊され、最大径が $\sim 50 \text{ km}$ 程度(ポラーナやエウラリアと同程度の大きさ)の天体と無数の小さな岩塊を形成することが分かった。現在のリュウグウは、この衝突で生まれた岩塊が再集合してできたと考えられる。
- ・衝突破壊のシミュレーションにより、衝突時に高温高压に達するのは、衝突の震源近くのみであり(10GPa 以上の衝撃圧を経験するのは母天体の 0.2%程度)、母天体の大部分は高温高压を経験せずに破壊される。リュウグウのサンプルからは、強い衝突の証拠はほとんど見つからなかった。このことから、現在のリュウグウを形成した岩塊は、リュウグウ母天体の衝突の震源から離れた物質であることがわかる。

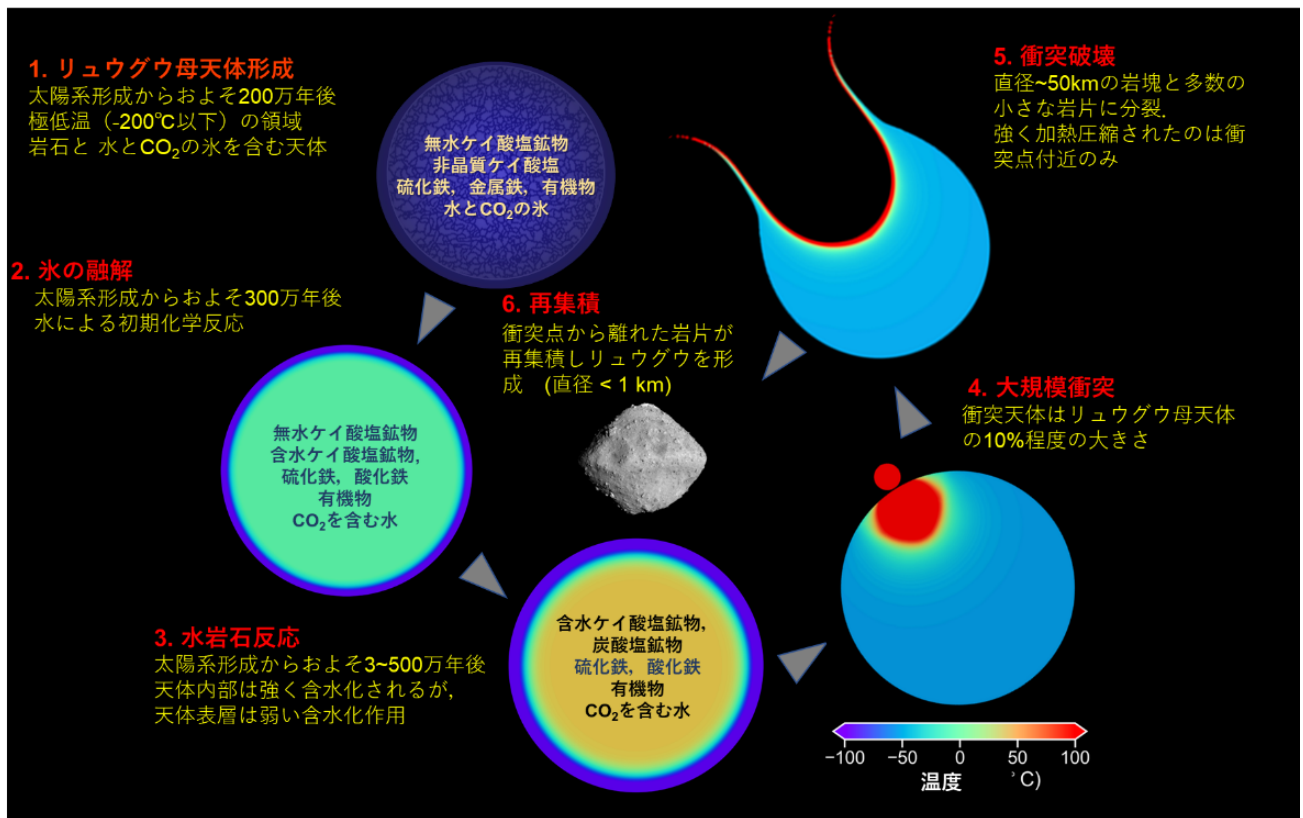
以上のプロセスを経て、現在のリュウグウが形成されたと考えられる(図 2)。太陽系の中には、リュウグウのような水を含む小惑星の方が水を含まない天体よりも広範囲に分布している。本研究により、太陽から遠く離れた木星の外側の極低温の領域で、どのように小惑星が形成され、進化し、破壊され、現在の姿まで変成していったのか、示すことができた。これにより、太陽系形成に関する多くの未解決の問題のうち、いくつかの問題について、解決の道筋を示すことができた。

本研究は、中村が代表の科学研究費(20H00188(基盤研究 A)および 21H00159(新学術領域 公募研究))の研究助成を受けている。



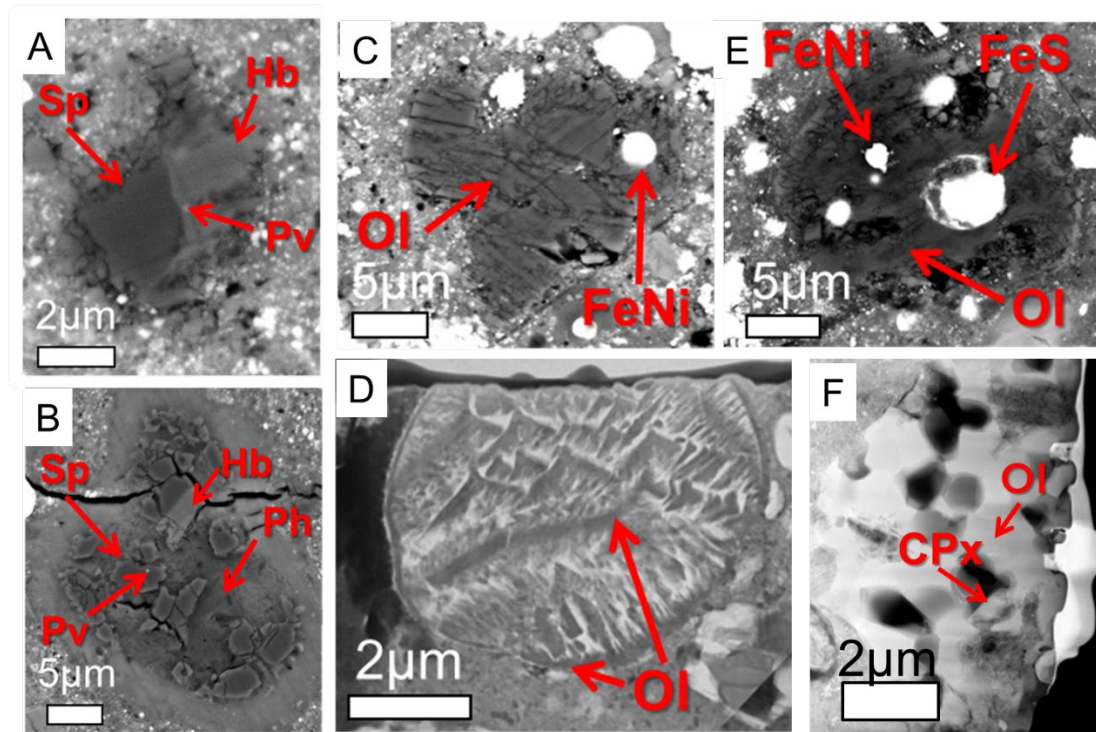
© SPring-8、東北大学

図 1: (A)分析した最大のサンプル C0002 の光学顕微鏡写真と(B)SPring-8 の放射光 X 線 CT 分析で得られたサンプル内部の CT 図。サンプル全域が細粒な物質(灰色)で構成されていることがわかる。



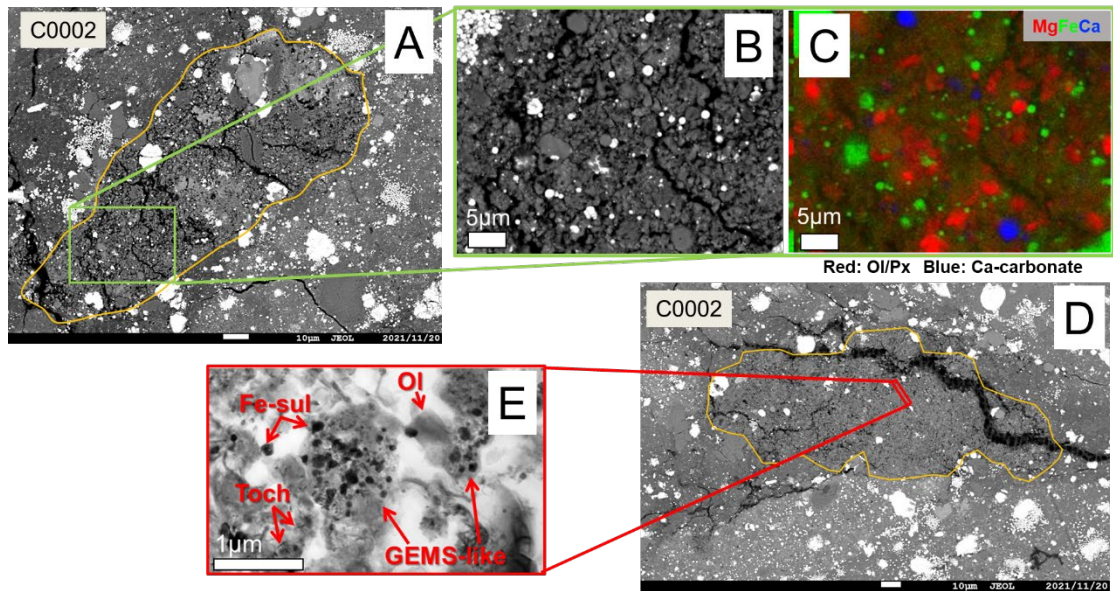
© MIT、千葉工業大学、東京工業大学、東北大学

図 2: リュウグウサンプルの分析結果から推定されるリュウグウの形成進化プロセス。天体の温度分布や年代、衝突破壊のプロセスは数値シミュレーションで求めた。



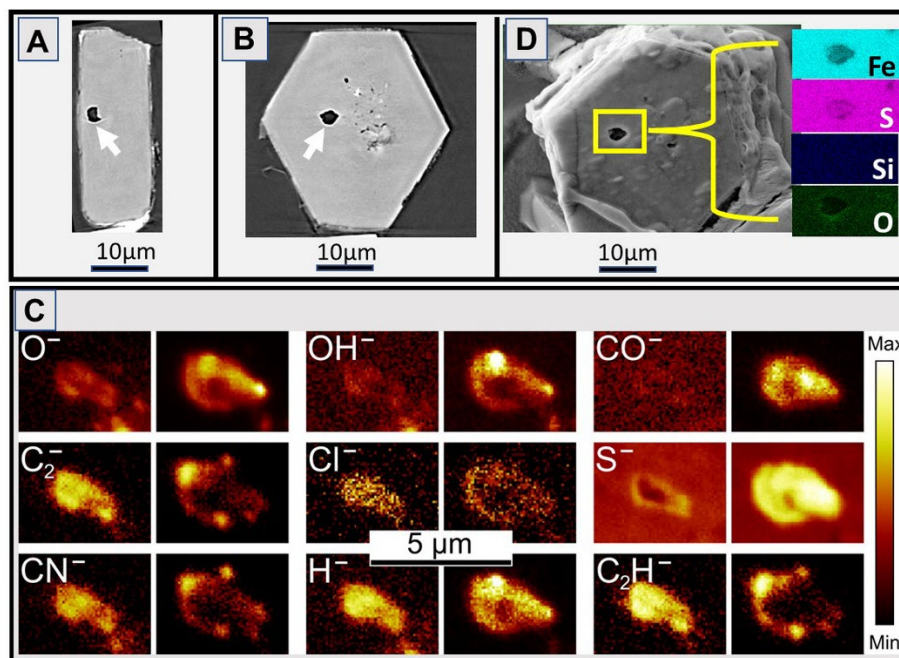
© 東北大学

図 3: リュウグウサンプル中に発見された高温環境(1000°C以上)で形成された粒子(すべて電子顕微鏡写真)。(A、B) Ca、Al に富む包有物、(B-D) 溶融したカンラン石(Ol)、金属鉄(FeNi)、硫化鉄(FeS)から形成されるコンドリュール⁷⁾、(F) アメーバー状カンラン石集合体に類似した多孔質な粒子。



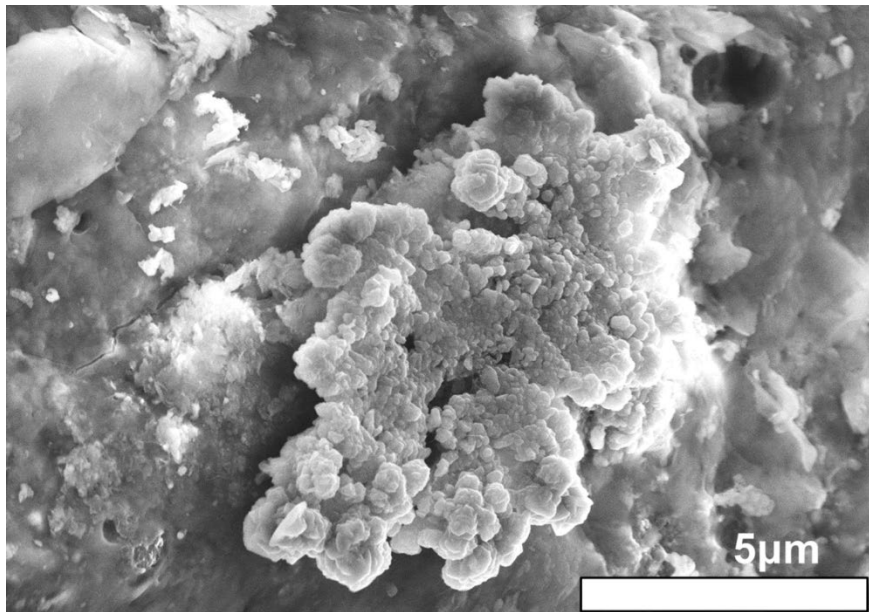
© 東北大学

図 4: C0002 サンプル中に発見された天体形成時の始原的な特徴を残した岩片(電子顕微鏡写真)。(A)細粒で多孔質な岩片の全体像、(B)岩片の一部を拡大したもの、(C)B と同じ領域の元素分布。赤色の粒子はカンラン石、または輝石を示し、これらの鉱物が多産していることがわかる。(D)細粒で多孔質な岩片の全体像、(E)D の一部を拡大したもの。1 ミクロン以下の非晶質ケイ酸塩や硫化鉄で形成される微粒子(写真中で GEMS-like と表示)、およびカンラン石(Ol)などが主な構成物質である。



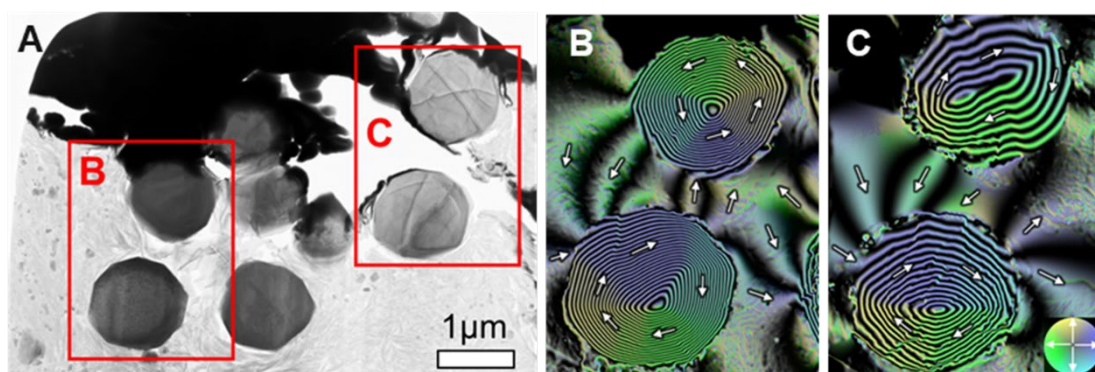
© 東北大学、NASA/JSC、SPRing-8

図 5: リュウグウサンプル中の 6 角板状の結晶(硫化鉄)の内部に発見された水と CO_2 を主成分とする液体。(A、B) 硫化鉄結晶中の空孔の CT 像。数ミクロンの大きさの空孔(白矢印)が結晶中に存在している、(C)質量分析計で測定した空孔内に含まれていた様々なイオン種(同じ分子種の 2 枚の写真は、左側が空孔上部、右側が空孔中部に含まれていたイオン種を示す)。結晶の温度を -120°C にして、空孔中の液体を凍らせて分析した。(D)分析後の空孔中の液体を蒸発させて、空孔内部を観察した結果、結晶を構成する元素(鉄と硫黄)以外は検出されなかった。空孔内には液体以外の固体成分は存在しないことを示す。



© 東北大学

図 6: リュウグウサンプル表面に発見されたテーブルサンゴに似た形をした結晶(電子顕微鏡像)。極微小の薄い結晶が積み重なるようにして成長している。



© JFCC、北海道大学、日立、東北大学

図 7: 球状の磁鉄鉱(Fe_3O_4)結晶に刻まれた古地磁気の記録。リュウグウ試料から切り出した磁鉄鉱の透過型電子顕微鏡像(A)と電子線ホログラフィー法により得られた磁束分布像(B、C)。矢印と色は磁化の方位。粒子の内部に見られる同心円状の縞模様は、磁力線が矢印の方向に巻いていることを示している(渦状磁区構造と呼ばれる)。粒子の外側に見られる磁力線は粒子からの漏れ磁場で、リュウグウ母天体の内部が温まり、水と鉱物の反応が起こった時のリュウグウの磁場環境を反映している。

語句説明

- 1) Ca、Al に富む包有物: 太陽系で最古の固体粒子。太陽系形成期に太陽近くの高温のガスから凝縮してできたと考えられている。
- 2) リュウグウ母天体: 誕生時のリュウグウ。直径はおよそ 100km 程度であったと考えられる。この母天体が破壊されて現在のリュウグウになった。
- 3) 原始太陽系星雲、星雲ガス: 45 億 6700 万年前に誕生した直後の太陽系に存在していたと考えられる太陽を取り巻くガス円盤。現在の太陽系には存在せず、太陽系形成期の早い段階で消失したと考えられている。
- 4) ミュオン: 電子の約 200 倍の質量をもつ素粒子。

- 5) 小惑星族: 小惑星族とは、軌道長半径、離心率、軌道傾斜角など類似の固有軌道要素を持つ小惑星の集団である。同じ族に属する小惑星は、共通の母天体の衝突破壊によって形成された破片群であると考えられている。
- 6) Sugita et al,(2019) Science 364, eaaw0442. doi:10.1126/science.aaw0422/
- 7) コンドリュール: 小惑星起源の隕石に多く含まれている球状、またはそれに近い形態の粒子である。原始太陽系星雲内部で 1200°C 以上の加熱の後、急速に冷却されたことによってできたと考えられている。

【論文情報】

雑誌名 : Science

論文タイトル : Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples

著者 : T. Nakamura¹, M. Matsumoto¹, K. Amano¹, Y. Enokido¹, M. E. Zolensky², T. Mikouchi³, H. Genda⁴, S. Tanaka^{5,6}, M. Y. Zolotov⁷, K. Kurosawa⁸, S. Wakita⁹, R. Hyodo⁵, H. Nagano¹⁰, D. Nakashima¹, Y. Takahashi^{11,12}, Y. Fujioka¹, M. Kikuri¹, E. Kagawa¹, M. Matsuoka^{13,14}, A. J. Brearley¹⁵, A. Tsuchiyama^{16,17,18}, M. Uesugi¹⁹, J. Matsuno¹⁶, Y. Kimura²⁰, M. Sato¹¹, R. E. Milliken²¹, E. Tatsumi^{22,11}, S. Sugita^{11,8}, T. Hiroi²¹, K. Kitazato²³, D. Brownlee²⁴, D. J. Joswiak²⁴, M. Takahashi¹, K. Ninomiya²⁵, T. Takahashi^{26,27}, T. Osawa²⁸, K. Terada²⁹, F. E. Brenker³⁰, B. J. Tkalcec³⁰, L. Vincze³¹, R. Brunetto³², A. Aléon-Toppani³², Q. H. S. Chan³³, M. Roskosz³⁴, J.-C. Viennet³⁴, P. Beck³⁵, E. E. Alp³⁶, T. Michikami³⁷, Y. Nagaashi^{38,1}, T. Tsuji^{39,40}, Y. Ino^{41,5}, J. Martinez², J. Han⁴², A. Dolocan⁴³, R. J. Bodnar⁴⁴, M. Tanaka⁴⁵, H. Yoshida¹¹, K. Sugiyama⁴⁶, A. J. King⁴⁷, K. Fukushi⁴⁸, H. Suga⁴⁹, S. Yamashita^{50,51}, T. Kawai¹¹, K. Inoue⁴⁸, A. Nakato⁵, T. Noguchi^{52,53}, F. Vilas⁵⁴, A. R. Hendrix⁵⁴, C. Jaramillo-Correa⁵⁵, D. L. Domingue⁵⁴, G. Dominguez⁵⁶, Z. Gainsforth⁵⁷, C. Engrand⁵⁸, J. Duprat³⁴, S. S. Russell⁴⁷, E. Bonato⁵⁹, C. Ma⁶⁰, T. Kawamoto⁶¹, T. Wada¹, S. Watanabe^{5,26}, R. Endo⁶², S. Enju⁶³, L. Riu⁶⁴, S. Rubino³², P. Tack³¹, S. Takeshita⁶⁵, Y. Takeichi^{50,51,66}, A. Takeuchi¹⁹, A. Takigawa¹¹, D. Takir², T. Tanigaki⁶⁷, A. Taniguchi⁶⁸, K. Tsukamoto¹, T. Yagi⁶⁹, S. Yamada⁷⁰, K. Yamamoto⁷¹, Y. Yamashita⁶⁹, M. Yasutake¹⁹, K. Uesugi¹⁹, I. Umegaki^{72,65}, I. Chiu²⁵, T. Ishizaki⁵, S. Okumura⁵², E. Palomba⁷³, C. Pilorget^{32,74}, S. M. Potin^{13,75}, A. Alasli¹⁰, S. Anada⁷¹, Y. Araki⁷⁶, N. Sakatani^{70,5}, C. Schultz²¹, O. Sekizawa⁴⁹, S. D. Sitzman⁷⁷, K. Sugiura⁴, M. Sun^{17,18,78}, E. Dartois⁷⁹, E. De Pauw³¹, Z. Dionnet³², Z. Djouadi³², G. Falkenberg⁸⁰, R. Fujita¹⁰, T. Fukuma⁸¹, I. R. Gearba⁴³, K. Hagiya⁸², M. Y. Hu³⁶, T. Kato⁷¹, T. Kawamura⁸³, M. Kimura^{50,51}, M. K. Kubo⁸⁴, F. Langenhorst⁸⁵, C. Lantz³², B. Lavina⁸⁶, M. Lindner³⁰, J. Zhao³⁶, B. Vekemans³¹, D. Baklouti³², B. Bazi³¹, F. Borondics⁸⁷, S. Nagasawa^{26,27}, G. Nishiyama¹¹, K. Nitta⁴⁹, J. Mathurin⁸⁸, T. Matsumoto⁵², I. Mitsukawa⁵², H. Miura⁸⁹, A. Miyake⁵², Y. Miyake⁶⁵, H. Yurimoto⁹⁰, R. Okazaki⁹¹, H. Yabuta⁹², H. Naraoka⁹¹, K. Sakamoto⁵, S. Tachibana^{11,5}, H. C. Connolly Jr.⁹³, D. S. Lauretta⁹⁴, M. Yoshitake⁵, M. Yoshikawa^{5,6}, K. Yoshikawa⁹⁵, K. Yoshihara⁵, Y. Yokota⁵, K. Yogata⁵, H. Yano^{5,6}, Y. Yamamoto^{5,6}, D. Yamamoto⁵, M. Yamada⁸, T. Yamada⁵, T. Yada⁵, K. Wada⁸, T. Usui^{5,11}, R. Tsukizaki⁵, F. Terui⁹⁶, H. Takeuchi^{5,6}, Y. Takei⁵, A. Iwamae⁹⁷, H. Soejima^{5,97}, K. Shirai⁵, Y. Shimaki⁵, H. Senshu⁸, H. Sawada⁵, T. Saiki⁵, M. Ozaki^{5,6}, G. Ono⁹⁵, T. Okada^{5,98}, N. Ogawa⁵, K. Ogawa⁵, R. Noguchi⁹⁹, H. Noda¹⁰⁰, M. Nishimura⁵, N. Namiki^{100,6}, S. Nakazawa⁵, T. Morota¹¹, A. Miyazaki⁵, A. Miura⁵, Y. Mimasu⁵, K. Matsumoto^{100,6}, K. Kumagai^{5,97}, T. Kouyama¹⁰¹, S. Kikuchi^{8,100}, K. Kawahara⁵, S. Kameda^{70,5}, T. Iwata^{5,6}, Y. Ishihara¹⁰², M. Ishiguro¹⁰³, H. Ikeda⁹⁵, S. Hosoda⁵, R. Honda^{104,105}, C. Honda²³, Y. Hitomi^{5,97}, N. Hirata³⁸, N. Hirata²³, T. Hayashi⁵, M. Hayakawa⁵, K. Hatakeda^{5,97}, S. Furuya¹¹, R. Fukai⁵, A. Fujii⁵, Y. Cho¹¹, M. Arakawa³⁸, M. Abe^{5,6}, S. Watanabe¹⁰⁶, Y. Tsuda⁵.

- ¹Department of Earth Sciences, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan.
- ²NASA Johnson Space Center; Houston TX 77058, USA.
- ³The University Museum, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- ⁴Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan.
- ⁵Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagami-hara 252-5210, Japan.
- ⁶Department of Space and Astronautical Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Hayama 240-0193, Japan.
- ⁷School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe AZ 85287, USA.
- ⁸Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino 275-0016, Japan.
- ⁹Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, USA.
- ¹⁰Department of Mechanical Systems Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan.
- ¹¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- ¹²Isotope Science Center, The University of Tokyo, Tokyo 113-0032, Japan
- ¹³Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA), Observatoire de Paris, Meudon 92195 France
- ¹⁴Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, 305-8567, Japan.
- ¹⁵Department of Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque NM 87131, USA.
- ¹⁶Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Kusatsu 525-8577, Japan.
- ¹⁷Chinese Academy of Sciences (CAS) Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China.
- ¹⁸CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, China.
- ¹⁹Scattering and Imaging Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo 679-5198, Japan.
- ²⁰Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan.
- ²¹Department of Earth, Environmental, and Planetary Sciences, Brown University, Providence, RI 02912, USA.
- ²²Instituto de Astrofísica de Canarias, University of La Laguna, Tenerife 38205, Spain.
- ²³Aizu Research Center for Space Informatics, The University of Aizu, Aizu-Wakamatsu 965-8580, Japan.
- ²⁴Department of Astronomy, University of Washington, Seattle WA 98195 USA.
- ²⁵Institute for Radiation Sciences, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan.
- ²⁶Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (The World Premier International Research Center Initiative), The University of Tokyo, Kashiwa 277-8583, Japan.
- ²⁷Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- ²⁸Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai 319-1195, Japan.
- ²⁹Department of Earth and Space Science, Osaka University; Toyonaka 560-0043, Japan.
- ³⁰Institute of Geoscience, Goethe University, Frankfurt, 60438 Frankfurt am Main, Germany.
- ³¹Department of Chemistry, Ghent University, Krijgslaan 281 S12, Ghent, Belgium.
- ³²Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, Orsay 91405, France.
- ³³Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London, Egham TW20 0EX, UK.
- ³⁴Institut de Minéralogie, Physique des Matériaux et Cosmochimie, Muséum National d'Histoire Naturelle, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Sorbonne Université, Paris, France.
- ³⁵Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, CNRS, Université Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France.
- ³⁶Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, USA.
- ³⁷Faculty of Engineering, Kindai University, Higashi-Hiroshima 739-2116, Japan.
- ³⁸Department of Planetology, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan.
- ³⁹Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan.
- ⁴⁰School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- ⁴¹Department of Physics, Kwansei Gakuin University, Sanda 669-1330, Japan.
- ⁴²Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston, Houston TX 77204, USA.
- ⁴³Texas Materials Institute, The University of Texas at Austin, Austin TX 78712, USA.

- ⁴⁴Department of Geoscience, Virginia Tech., Blacksburg VA 24061, USA.
- ⁴⁵Materials Analysis Station, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Japan.
- ⁴⁶Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan.
- ⁴⁷Department of Earth Science, Natural History Museum, London SW7 5BD, UK.
- ⁴⁸Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan.
- ⁴⁹Spectroscopy Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Sayo 679-5198, Japan.
- ⁵⁰Department of Materials Structure Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan.
- ⁵¹Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba 305-0801, Japan.
- ⁵²Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan
- ⁵³Faculty of Arts and Science, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan.
- ⁵⁴Planetary Science Institute, Tucson AZ 85719, USA.
- ⁵⁵The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA.
- ⁵⁶Department of Physics, California State University, San Marcos, CA 92096, USA.
- ⁵⁷Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720, USA.
- ⁵⁸Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay, France.
- ⁵⁹Institute for Planetary Research, Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt, Rutherfordstraße 2 12489 Berlin, Germany.
- ⁶⁰Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA 91125, USA.
- ⁶¹ Department of Geosciences, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan.
- ⁶²Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan.
- ⁶³Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan.
- ⁶⁴European Space Astronomy Centre, 28692 Villanueva de la Cañada, Spain.
- ⁶⁵High Energy Accelerator Research Organization, Tokai 319-1106, Japan.
- ⁶⁶Department of Applied Physics, Osaka University, Suita, 565-0871, Japan
- ⁶⁷Hitachi, Ltd., Hatoyama 350-0395, Japan.
- ⁶⁸Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University, Kumatori 590-0494, Japan.
- ⁶⁹National Metrology Institute of Japan, AIST, Tsukuba 305-8565, Japan.
- ⁷⁰Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan.
- ⁷¹Japan Fine Ceramics Center, Nagoya 456-8587, Japan.
- ⁷²Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute 480-1192, Japan.
- ⁷³Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Istituto Nazionale di Astrofisica, Rome 00133, Italy.
- ⁷⁴Institut Universitaire de France, Paris, France.
- ⁷⁵Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
- ⁷⁶Department of Physical Sciences, Ritsumeikan University, Shiga 525-0058, Japan.
- ⁷⁷Physical Sciences Laboratory, The Aerospace Corporation, California 90245, USA.
- ⁷⁸University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.
- ⁷⁹Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay, France.
- ⁸⁰Deutsches Elektronen-Synchrotron Photon Science, 22603 Hamburg, Germany.
- ⁸¹Nano Life Science Institute (The World Premier International Research Center Initiative), Kanazawa University, 920-1192, Japan.
- ⁸²Graduate School of Life Science, University of Hyogo, Hyogo 678-1297, Japan.
- ⁸³Institut de Physique du Globe de Paris, Université de Paris, Paris 75205, France.
- ⁸⁴Division of Natural Sciences, International Christian University, Mitaka 181-8585, Japan.
- ⁸⁵Institute of Geosciences, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07745 Jena, Germany.
- ⁸⁶Center for Advanced Radiation Sources, The University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA.
- ⁸⁷Optimized Light Source of Intermediate Energy to LURE (SOLEIL) Synchrotron, L'Orme des Merisiers, Gif sur Yvette Cedex, F-91192, France.
- ⁸⁸Institut Chimie Physique, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay, France.
- ⁸⁹Graduate School of Science, Nagoya City University, Nagoya 467-8501, Japan.
- ⁹⁰ Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan.

- ⁹¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan.
- ⁹²Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan.
- ⁹³Department of Geology, Rowan University, Glassboro NJ 08028, USA.
- ⁹⁴Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona; Tucson AZ 85721, USA.
- ⁹⁵Research and Development Directorate, JAXA, Sagami-hara 252-5210, Japan.
- ⁹⁶Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi 243-0292, Japan.
- ⁹⁷Marine Works Japan Ltd., Yokosuka 237-0063 Japan.
- ⁹⁸Department of Chemistry, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.
- ⁹⁹Faculty of Science, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan.
- ¹⁰⁰National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan.
- ¹⁰¹Digital Architecture Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo 135-0064, Japan.
- ¹⁰²JAXA Space Exploration Center, JAXA, Sagami-hara 252-5210, Japan.
- ¹⁰³Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Korea.
- ¹⁰⁴Department of Information Science, Kochi University, Kochi 780-8520, Japan
- ¹⁰⁵Center for Data Science, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan.
- ¹⁰⁶Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.

掲 載 誌: Science

DOI 番号: 10.1126/science.abn8671